

# « Propriétés et évolution des galaxies »

David Elbaz (delbaz@cea.fr)

Service d'Astrophysique - CEA Saclay

Tel: 01 69 08 54 39

La Voie lactée

Master Recherche M2 Astronomie & Astrophysique

Enseignement thématique des parcours M2 - Galaxies

[http://david.elbaz3.free.fr/master\\_m2](http://david.elbaz3.free.fr/master_m2)

# La Voie Lactée

1. La découverte de la raie de l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm
2. La raie à 21cm & les bras spiraux, la barre et le "dark halo"
3. La structure spirale
4. Théorème du viriel et masse de la Voie Lactée
5. Les populations stellaires
7. Détermination de la masse des composantes stellaires
8. Les composantes de la Voie Lactée

# 1 La découverte de la raie de l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm

Radioastronomie : de 1 mm à 15 m (au-delà de 15 m, l'ionosphère devient réfléchissante).

En 1880, Edison tenta d'observer le Soleil en utilisant un radiotélescope, mais abandonna car on estima en 1902 que le rayonnement émis par le Soleil était trop faible (loi de Planck).

En 1932, Karl Jansky découvre une émission en continu radio de la V.L. (à 14.6m), dont on ne comprend pas l'origine. Van de Hulst (1944) donne l'explication des raies radio (1 & 2):

1. **Raies de recombinaison** → associées aux régions HII (gaz ionisé par les étoiles massives)

2. **Raie de structure hyperfine à 21 cm** → associée aux régions HI (gaz neutre)

3. A cela, il faut ajouter le **rayonnement synchrotron** responsable de l'émission continue ( $e^-$  se déplaçant dans un champ magnétique), principalement issu des restes de supernovae qui accélèrent les électrons.

En 1951, Ewen & Purcell détectent la raie à 21 cm prédite par Van de Hulst.

# Raies de recombinaison : associées aux régions HII (gaz ionisé par les étoiles massives)

## Raies de recombinaison des régions HII:

$$E_{\infty} - E_1 = 13.6 \text{ eV} \rightarrow \lambda = 913.5 \text{ \AA}$$

Les photons de  $\lambda < 913.5 \text{ \AA}$  ionisent l'H

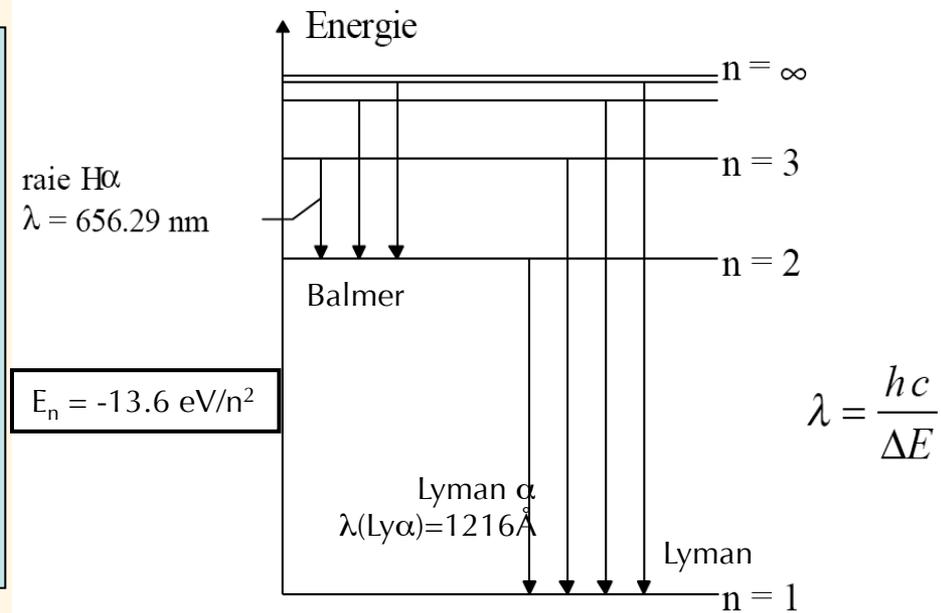
On parle alors de HII (=H+) par opposition à HI.

La recombinaison des  $e^-/p^+$  entre  $n=110$  et  $109$  et  $n=105$  et  $104$  correspond à la radio ( $\approx 5 \text{ cm}$ )!

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  = constante de Planck

$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

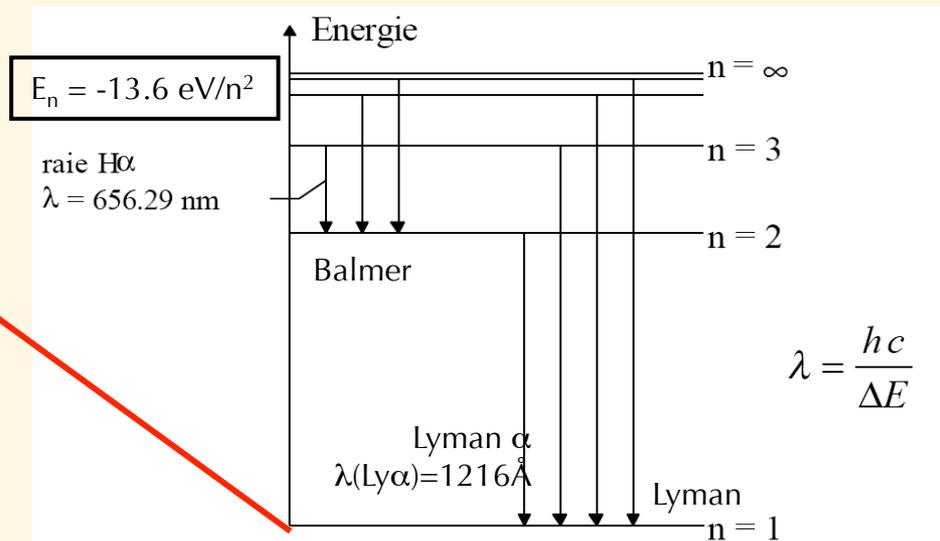
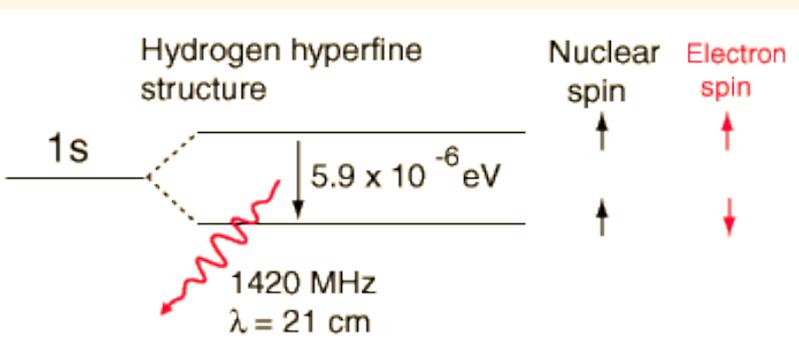


# Raie de structure hyperfine à 21 cm : associée aux régions HI (gaz neutre)

≈ 10 % de la masse baryonique (gaz + étoiles) de la Voie Lactée est sous la forme de HI.

La raie à 21 cm de l'hydrogène est une **raie de structure hyperfine**:

le niveau 1s (n=1, l=0, niveau fondamental) de l'électron est subdivisé en deux niveaux selon le couplage parallèle (niveau excité) ou anti-parallèle (niveau inférieur) des spins du proton et de l'électron.



Différence entre les 2 niveaux ( $5.9 \times 10^{-6} \text{ eV}$ ) = niveau fondamental ( $-13.6 \text{ eV}$ )/2 millions collisions entre atomes → passage du niveau anti-parallèle à parallèle (niveau excité de l'électron)

puis l'e<sup>-</sup> se désexcite en rayonnant à 21 cm en  $10^7$  ans, 10 millions d'années.

Les collisions accélèrent aussi les désexcitations et donc l'émission de la raie à 21 cm.

La V.L. contient  $3 \times 10^9 M_{\odot}$  de HI dont 70% au-delà du soleil par rapport au centre de la VL.

M31 (Andromède)

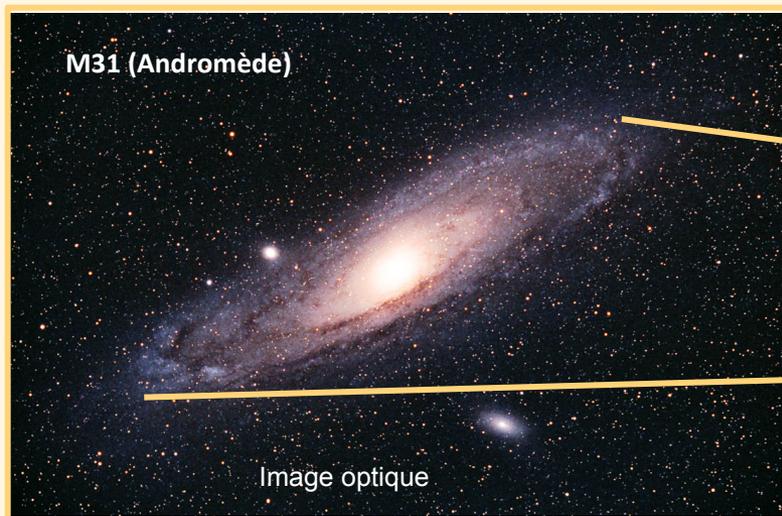
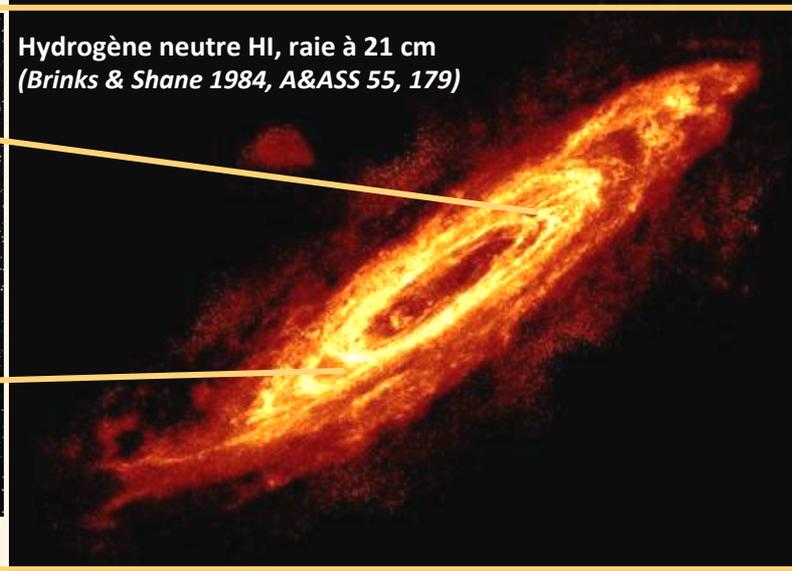
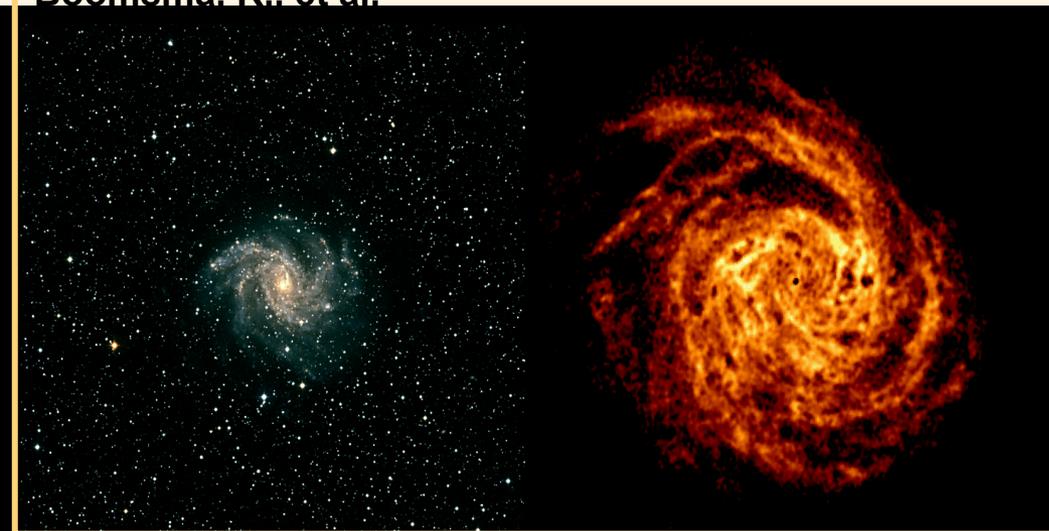


Image optique

Hydrogène neutre HI, raie à 21 cm  
(Brinks & Shane 1984, A&ASS 55, 179)



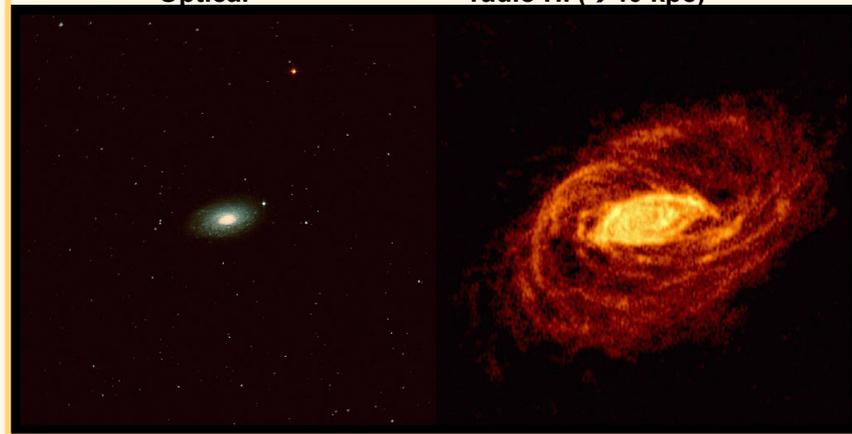
NGC 6946 - Westerbork Synthesis Radio Telescope  
Boomsma, R., et al.



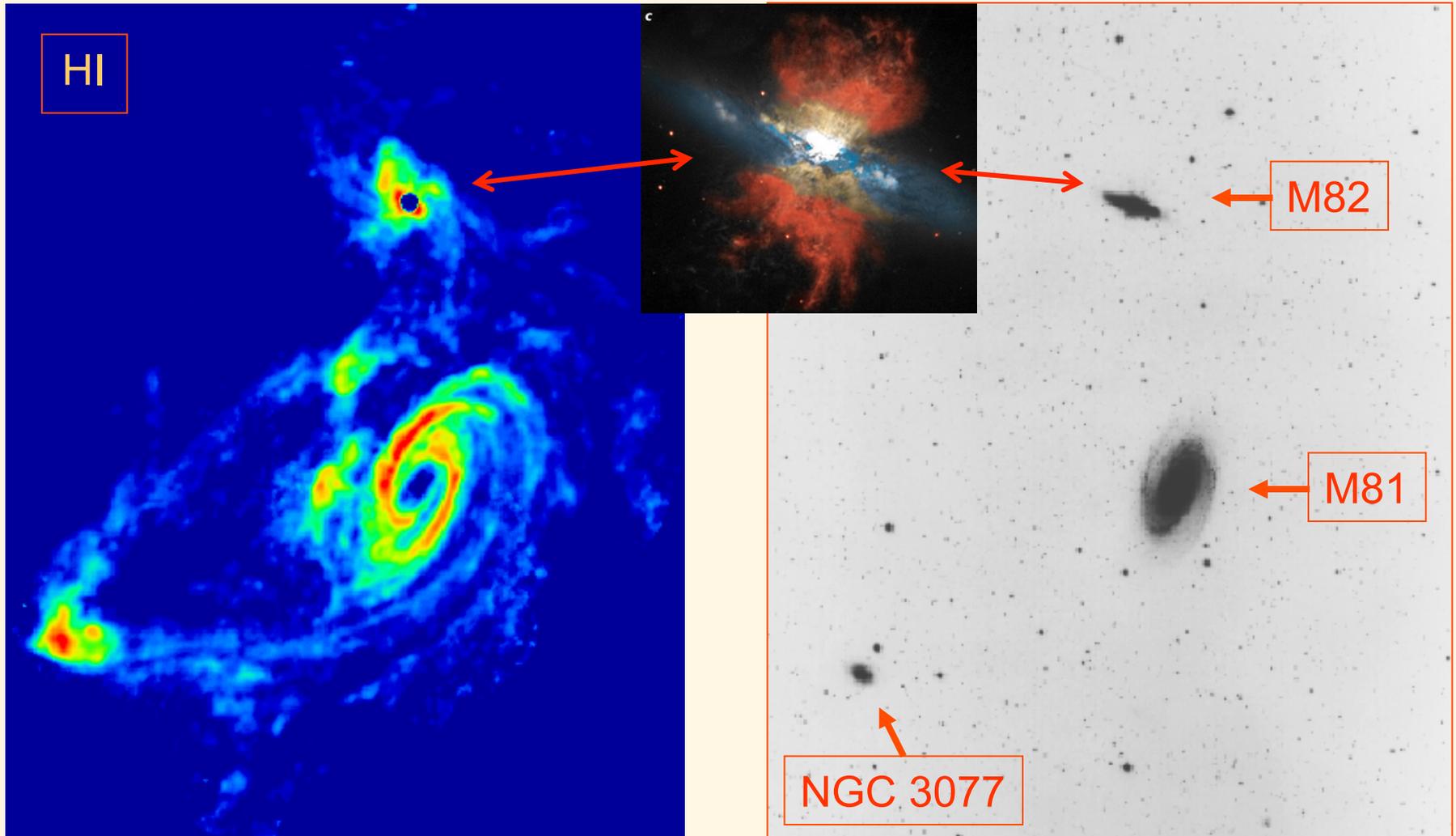
Avantages de la raie HI:

- radio ( $> 1$  mm) pas d'extinction par la poussière (taille caractéristique  $< 10 \mu\text{m}$ ).
- permet de mesurer la dynamique des galaxies  $\gg$  rayon optique. HI  $\rightarrow 30$  kpc de la Voie Lactée

NGC 5055 - Westerbork Synthesis Radio Telescope  
G. Battaglia, F. Fraternali, T. Oosterloo, R. Sancisi  
Optical radio HI ( $\rightarrow 40$  kpc)



Flambée de formation d'étoiles et interaction "cachée": le cas de M82 et M81  
Grâce au HI, on découvre des ponts de matière qui relient des galaxies  
apparemment isolées...



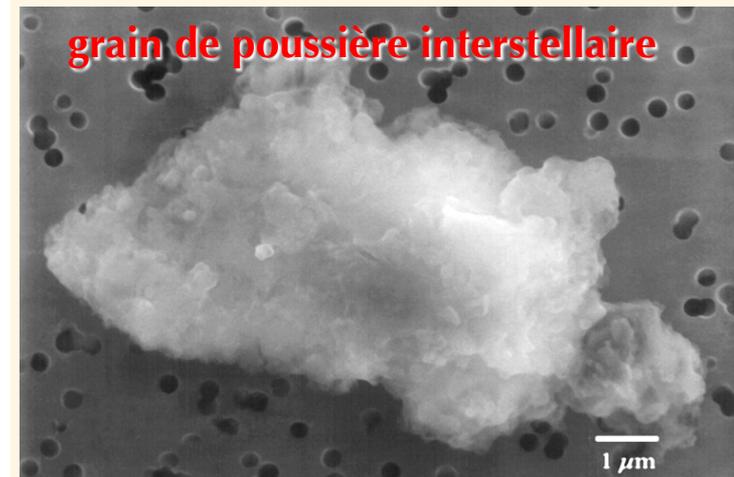
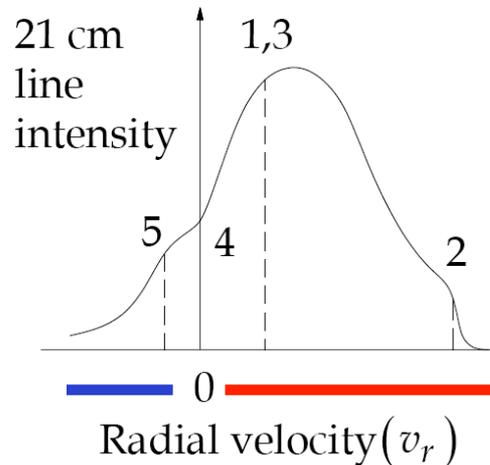
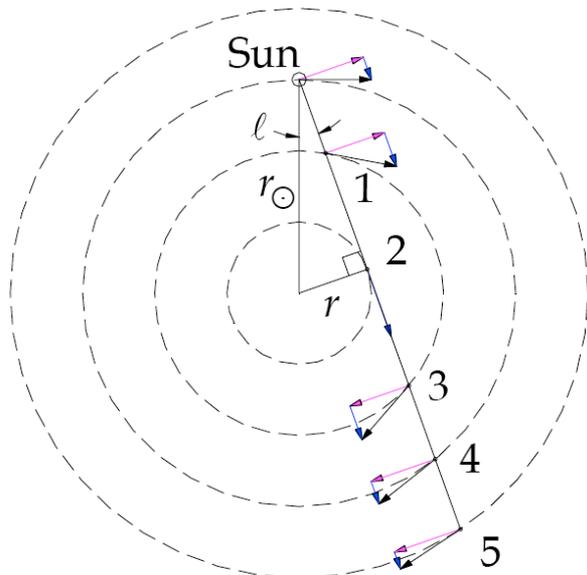
# Cartographie de la Voie Lactée grâce à l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm

Avantage de la raie HI: le domaine radio correspond à des longueurs d'ondes bien plus grandes que la taille caractéristique ( $<10 \mu\text{m}$ ) des grains de poussière interstellaire et en conséquence ne subit pas d'extinction par elle.

On a pu ainsi observer le HI jusqu'à 30 kpc et mieux cartographier la Voie Lactée.

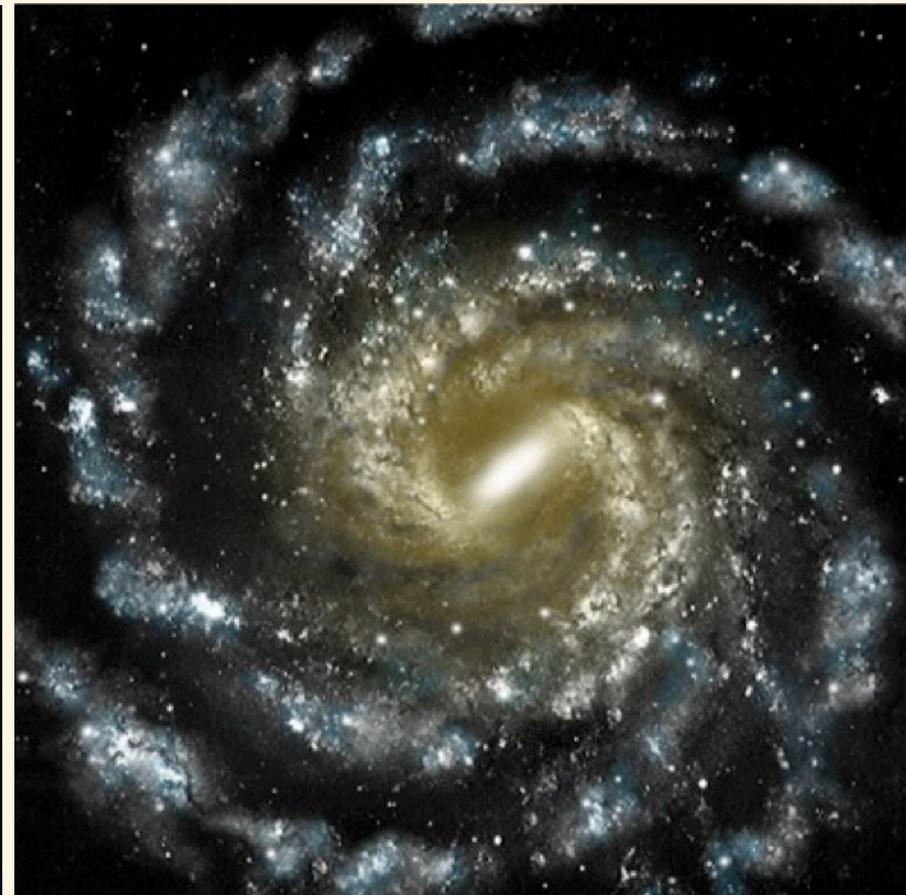
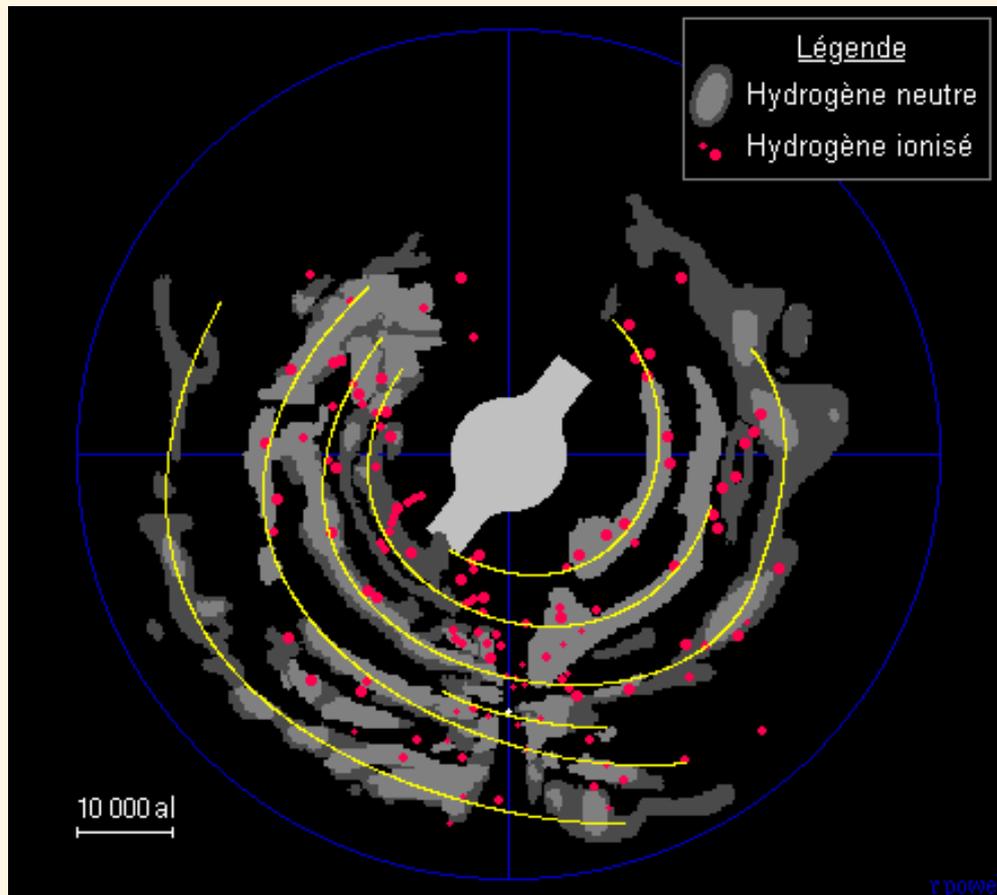
## Morphologie de la Voie Lactée dérivée de la raie HI:

- (i) Intensité de la raie à 21 cm  $\sim$  densité de HI
  - (ii) Distance déduite de la vitesse radiale par le décalage Doppler de la raie
- $\Rightarrow$  structure spirale de la V.L. directement identifiée.



## 2 La raie à 21cm révèle les bras spiraux de la Voie lactée

On a ainsi non seulement confirmé la forme de disque mais aussi celle de concentrations de gaz associées aux bras spiraux de la Voie Lactée (Oort, Kerr, Westerhout 1958, cf image). Celle-ci fut confirmée par une carte des régions HII (grâce à la raie de recombinaison  $H\alpha$  à 6563 Å) montrant les bras spiraux (Georgelin & Georgelin 1976, Taylor & Cordes 1993).



## 2 La raie à 21cm révèle une barre au centre de la Voie lactée

- Plus récemment, la surprise est venue de la découverte de la présence d'une barre au centre de la Voie Lactée. Soupçonnée par les travaux des années 1970 (Peters 1975), prouvée plus tard (Blitz & Spergel 1991, López-Corredoira et al. 2001) par des travaux concluant que la barre centrale de la Voie Lactée ressemble fortement à celle que l'on peut observer dans la galaxie spirale M95.



## 2 La raie à 21cm révèle le "dark halo"

- Dans les années 1970 on a constaté que la vitesse de rotation du gaz HI dans la périphérie de la V.L. impliquait une masse "dynamique" supérieure à la masse "visible" de la V.L. qui a été interprétée comme la preuve de la présence d'un halo de matière noire ou masse cachée, dont la masse est 10 fois supérieure à celle de la matière visible (étoiles+ gaz).

## 2 Le "dark halo"

Plusieurs techniques ont permis de mesurer la rotation des galaxies en fonction de l'éloignement au centre = courbes de rotation:

(i) Les raies spectrales des étoiles (absorption) et du gaz ionisé par les étoiles ( $H_{\alpha}$ ) décalées par effet Doppler  $\Rightarrow$  la vitesse radiale des étoiles

(ii) la vitesse du gaz en hydrogène neutre (HI) par la raie en émission à 21 cm de HI.

= plates à grande distance du centre, i.e.  $v_{\text{rot}} = \text{constante}$ :  $M(\leq r) = v_{\text{rot}}^2(r)r/G \Rightarrow M(\leq r) \sim r$

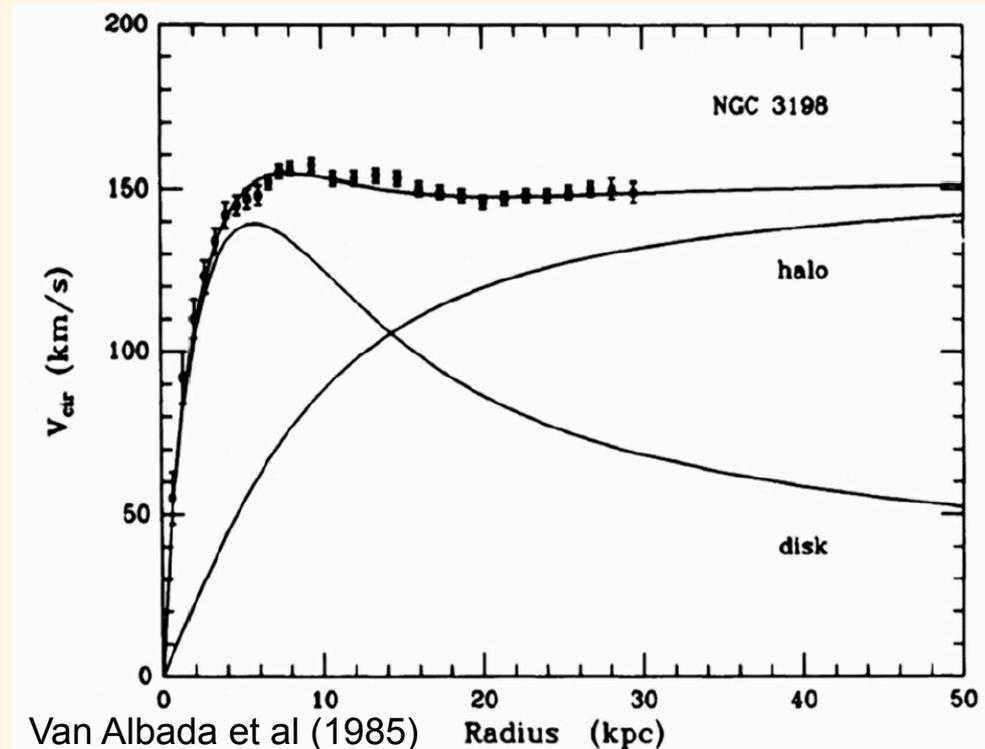
- Alors que la distribution de lumière des **galaxies spirales** décroît de manière exponentielle:

$$I(r) = I_0 \exp(-r/h)$$

$\Rightarrow$  ***M/L augmente avec le rayon***

$\Rightarrow$  la masse diminue moins vite que la lumière

$\Rightarrow$  **Un halo de matière noire (masse cachée) en  $1/r^2$  permet de rendre compte de ces courbes de rotation.**



# A NUMERICAL STUDY OF THE STABILITY OF FLATTENED GALAXIES: OR, CAN COLD GALAXIES SURVIVE?\*

J. P. OSTRIKER

Princeton University Observatory

AND

P. J. E. PEEBLES

Joseph Henry Laboratories, Princeton University

*Received 1973 May 29*

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 186:467-480, 1973 December 1



There is some theoretical reason to believe that a highly flattened disk supported mainly by rotation is subject to large-scale (barlike) instabilities, whether the disk is composed of gas or stars. Yet there exist many galaxies where most of the light originates in an apparently flat rotating disk, and where the random stellar motions appear to be small compared to the systematic circular motion; i.e., they are apparently “cold.” Our own Galaxy is such a system, and it does not seem to suffer from any large-scale, large-amplitude, short-time-scale instability. Two questions naturally arise. Is a “cold” rotating disk of stars truly unstable? If so, how can we account for the apparent stability of our Galaxy? To supplement previous theoretical and numerical

# A NUMERICAL STUDY OF THE STABILITY OF FLATTENED GALAXIES: OR, CAN COLD GALAXIES SURVIVE?\*

1973

J. P. OSTRIKER

Princeton University Observatory

AND THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 186:467-480, 1973 December 1

P. J. E. PEEBLES

## c) *Astronomical Plausibility of a Massive Halo*

This is a lengthy question, and we only outline a few essential points here. The direct evidence from star counts is inconclusive. According to Oort (1965): “Some 5 percent of the total mass of the galaxy may be estimated to consist of these (K, M) dwarfs. There is no way for estimating how much more mass there may be in the form of intrinsically still fainter stars. The real mass of the halo remains entirely unknown. It is quite possible that there might be enough halo stars to make the halo an important contributor, or even *the* most important contributor to the mass of the Galactic System. The uncertainty concerning the relative contributions of the halo and disc to the total mass is the greatest obstacle in the way of constructing a model of the mass distribution in the Galaxy” (Oort’s italics).

There is some information available from dynamical studies, and several authors (see, for example, Belton and Brandt 1963; Vandervoort 1970) have concluded that the halo mass must be large; this finding was based on a comparison of the force laws perpendicular to the plane and perpendicular to the rotation axis. Although the standard models for the mass distribution in the Galaxy place most of the mass in the disk (e.g., Schmidt 1965), one of us (J. P. O.) has constructed simple dynamical models of the Galaxy from mass distributions which have halo-to-disk mass ratios of  $\geq 2/1$  but which satisfy all the usual dynamical constraints.

RATIOS OF GALAXIES<sup>1</sup> *S. M. Faber*<sup>2</sup>**1979**

Lick Observatory, Board of Studies in Astronomy and Astrophysics,  
University of California, Santa Cruz, California 95064

*J. S. Gallagher*

Department of Astronomy, University of Illinois, Urbana, Illinois 618

Is there more to a galaxy than meets the eye (or can be seen on a photograph)? Many decades ago, Zwicky (1933) and Smith (1936) showed that if the Virgo cluster of galaxies is bound, the total mass must considerably exceed the sum of the masses of the individual member galaxies; i.e. there appeared to be “missing mass” in the cluster. As more data became available, the discrepancy persisted between masses of individual galaxies determined from optical rotation curves and the larger average galaxy mass needed to bind groups and clusters (e.g. Neyman, Page & Scott 1961).

Recently, however, new information has pointed toward larger total masses for individual galaxies, thus decreasing the traditional discrepancy between various methods of mass measurement. Arguing that thin, self-gravitating stellar disks are unstable against bar-like modes, Ostriker & Peebles (1973) suggested that the disks of normal spiral galaxies must be imbedded in optically undetected, stabilizing massive halos. Ostriker, Peebles & Yahil (1974) and Einasto, Kaasik & Saar (1974) collected observational evidence in support of the existence of such halos (although Burbidge 1975 used similar data to reach the opposite conclusion). At nearly the same time, high-resolution 21-cm observations of nearby galaxies were showing that H I often extends well beyond the optical boundaries of galaxies and that rotation velocities are constant at large galactocentric distances. Simply interpreted, these measurements implied the presence of substantial mass outside the optically visible dimensions of galaxies.

# Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter

1984

George R. Blumenthal\* &amp; S. M. Faber\*

\* Lick Observatory, Board of Studies in Astronomy and Astrophysics, University of California, Santa Cruz, California 95064, USA

Joel R. Primack<sup>†§</sup> & Martin J. Rees<sup>‡§</sup><sup>†</sup> Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305, USA<sup>‡</sup> Institute of Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, California 93106, USA

*The dark matter that appears to be gravitationally dominant on all scales larger than galactic cores may consist of axions, stable photinos, or other collisionless particles whose velocity dispersion in the early Universe is so small that fluctuations of galactic size or larger are not damped by free streaming. An attractive feature of this cold dark matter hypothesis is its considerable predictive power: the post-recombination fluctuation spectrum is calculable, and it in turn governs the formation of galaxies and clusters. Good agreement with the data is obtained for a Zeldovich ( $|\delta_k|^2 \propto k$ ) spectrum of primordial fluctuations.*

**Table 1**  $M/L_B$  and  $M/M_{lum}$  on various m

| Unit                          | $M^*$              | $M/L_B^\dagger$       |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Large clusters                | $10^{15} M_\odot$  | $316 \pm 40^\ddagger$ |
| Small E-dominated groups      | $5 \times 10^{13}$ | $83_{-10}^{+80}  $    |
| Small spiral-dominated groups | $2 \times 10^{13}$ | $40_{-10}^{+50}¶$     |

# Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter

We have shown that a Universe with  $\sim 10$  times as much cold dark matter as baryonic matter provides a remarkably good fit to the observed Universe. This model predicts roughly the observed mass range of galaxies, the dissipational nature of galaxy collapse, and the observed Faber–Jackson and Tully–Fisher relations. It also gives dissipationless galactic haloes and clusters. In addition, it may also provide natural explanations for galaxy–environment correlations and for the differences in angular momenta between ellipticals and spiral galaxies. Finally, the cold DM picture seems reasonably consistent with the observed large-scale clustering, including superclusters and voids. In short, it seems to be the best model available and merits close scrutiny and testing.

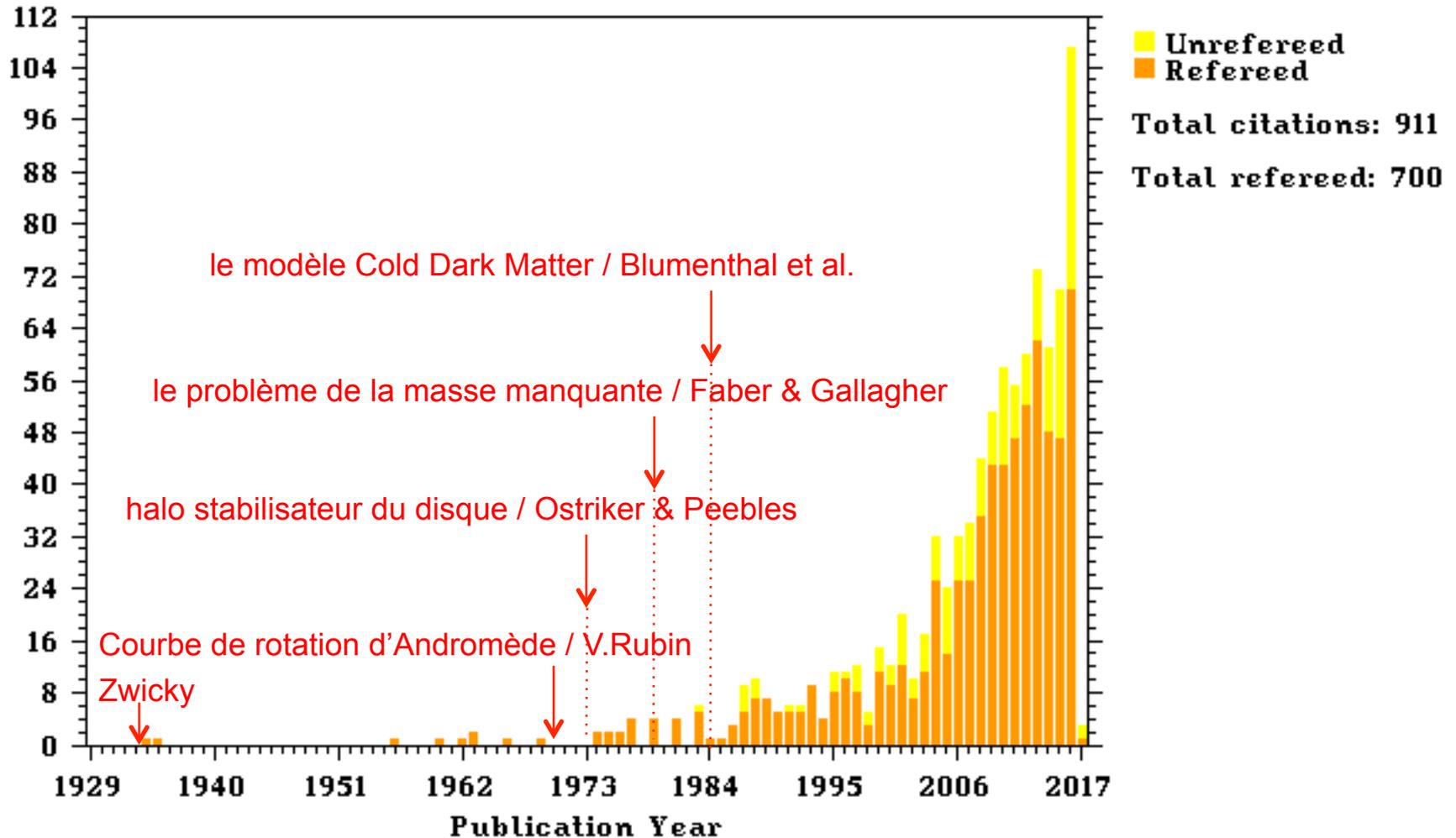
**Table 1**  $M/L_B$  and  $M/M_{lum}$  on various mass scales

| Unit                          | $M^*$              | $M/L_B^\dagger$       | $M_{gas}/M_{lum}$      | $M/M_{lum}$            |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Large clusters                | $10^{15} M_\odot$  | $316 \pm 40^\ddagger$ | $0.84_{-0.1}^{+0.0}\S$ | $8.4_{-1.0}^{+7.0}$    |
| Small E-dominated groups      | $5 \times 10^{13}$ | $83_{-10}^{+80}\ $    | $0.61_{-0.1}^{+0.1}\ $ | $5.4_{-2.0}^{+10.0}\ $ |
| Small spiral-dominated groups | $2 \times 10^{13}$ | $40_{-10}^{+50}\ $    | 0(?)                   | $14.2_{-6}^{+36}\#$    |
| Whole Milky Way               | $10^{12}^{**}$     | $50^\dagger\dagger$   | 0(?)                   | $14^\ddagger\ddagger$  |
| Dwarf spheroidals $\S\S$      |                    |                       |                        |                        |
| Stellar masses                | $10^{5-7}$         | 2.5                   | 0                      | 1                      |
| Dynamical masses              | $10^{6-8}$         | 30                    | 0                      | 12                     |

\* Total mass including dark matter.  $H = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$ .

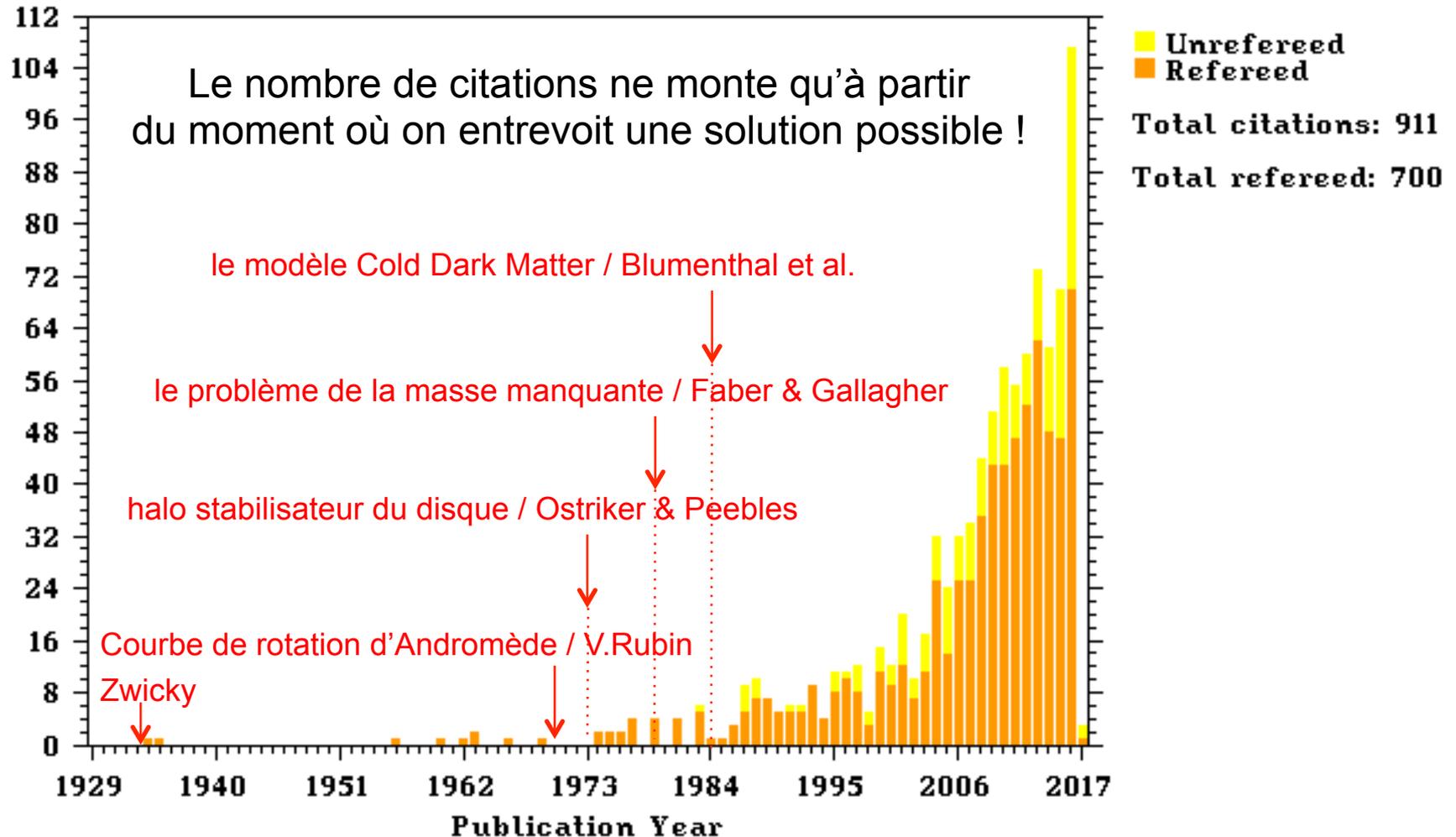
# Taux de citations de l'article pionnier de Zwicky 1933

## Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln von F. Zwicky. (16. II. 33.)



# Taux de citations de l'article pionnier de Zwicky 1933

## Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln von F. Zwicky. (16. II. 33.)



### 3 La structure spirale

- Les bras spiraux "traînent" dans la rotation.
- Ils ne s'enroulent pas plus d'une ou deux fois autour d'une galaxie
- La concentration de régions HII (=H<sup>+</sup>, hydrogène ionisé) et d'étoiles bleues est plus grande dans les bras qu'ailleurs dans une galaxie: le taux de formation d'étoiles y est supérieur.
- Des traces noires dues à l'absorption par la poussière interstellaire longent le bord des bras spiraux.
- Les nuages moléculaires sont plus massifs dans les bras qu'ailleurs.



## La structure spirale (suite)

- Les bulbes centraux sont la plupart du temps ovales ou elliptiques, plutôt qu'axi-symétriques.
- Parfois le bulbe présente une morphologie barrée: galaxies SB.
- Ceci est en accord avec les simulations numériques d'amas stellaires en rotation: avec des conditions initiales symétriques, les amas stellaires dessinent rapidement (en quelques périodes de rotation) des profils elliptiques ou barrés.



## Interprétation de la structure spirale

- La rotation différentielle (vitesse supérieure au centre qu'au bord) joue un rôle important mais elle ne suffit pas à expliquer la structure spirale: les bras ne s'enroulent pas plusieurs fois.
- Le taux de formation d'étoiles élevé dans les bras spiraux consumerait la totalité du gaz interstellaire qui y est localisé en un temps court par rapport à l'âge de l'univers. Or nous observons beaucoup de galaxies spirales dans le ciel, donc les bras ne sont pas matériels ! De la matière doit circuler constamment à l'intérieur et en sortir.
- Les masses des complexes de nuages moléculaires contenus dans les bras spiraux et le fort taux de formation d'étoiles impliquent tous deux que la matière interstellaire contenue dans les bras spiraux soit comprimée, en comparaison du reste du disque d'une galaxie.

## Interprétation de la structure spirale

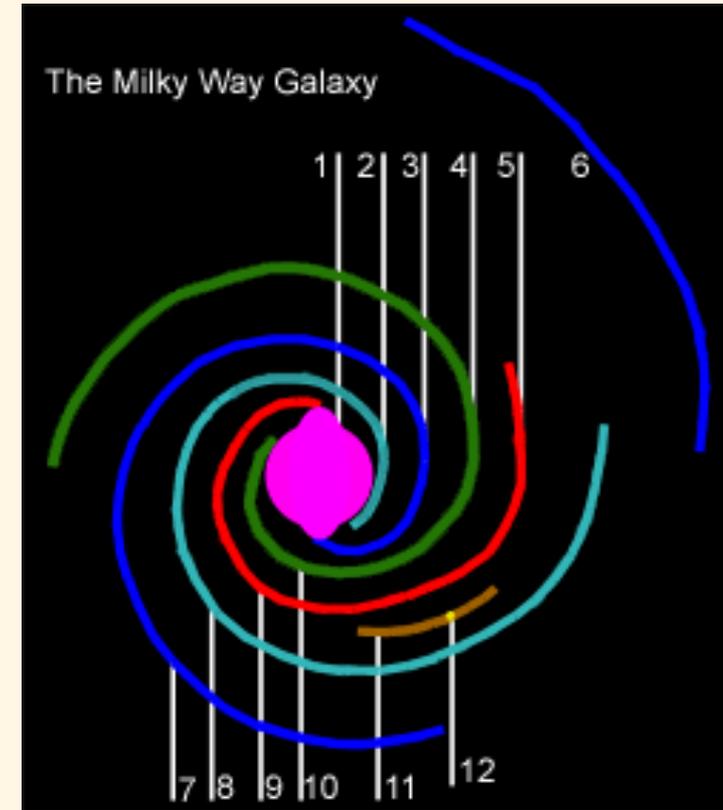
Lin et Shu (1963): ondes de densité pour expliquer la persistance des structures spirales.

Les bras spiraux = ondes stationnaires, permettant aux nuages d'hydrogène de s'agglomérer pour former de nouvelles étoiles.

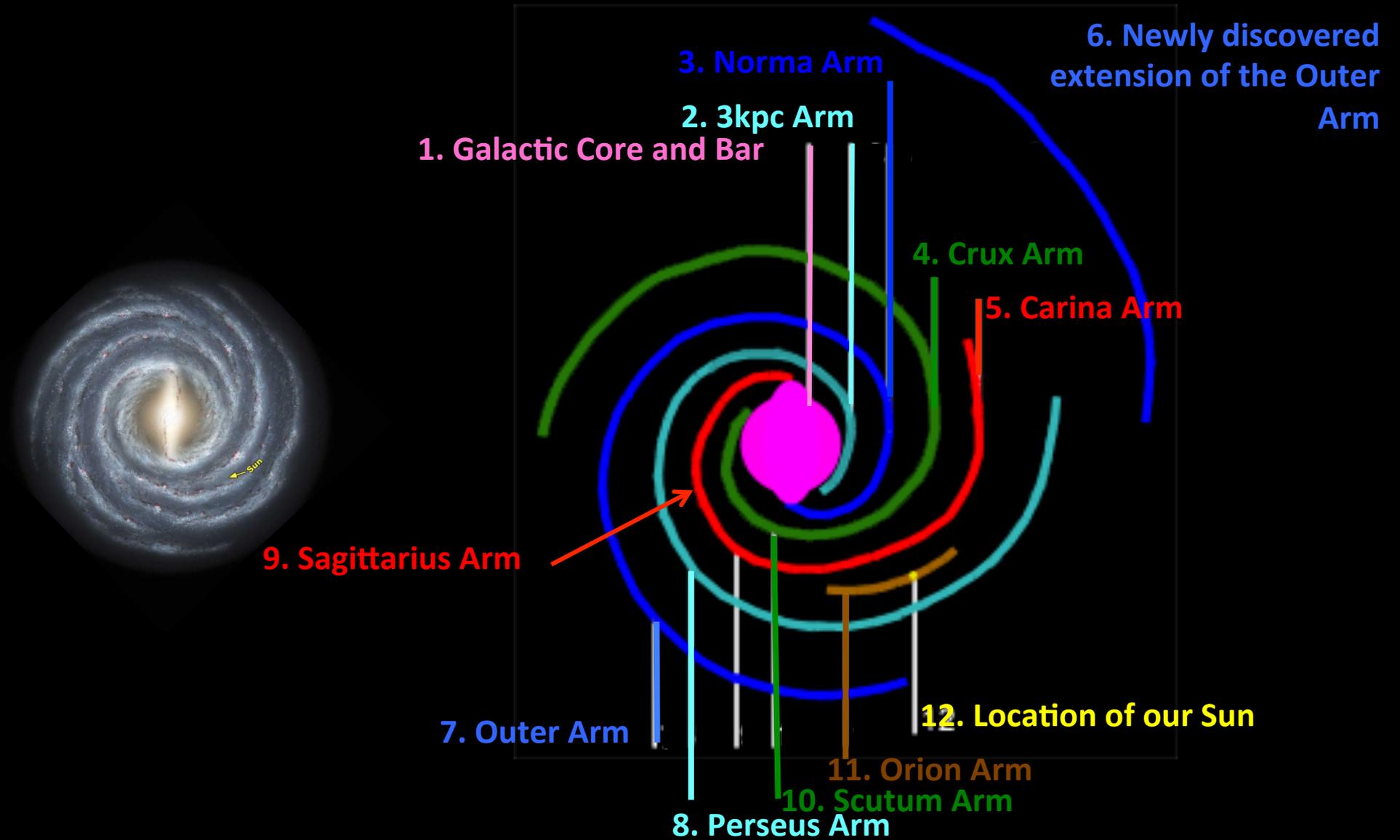
Les étoiles se déplacent à une vitesse différente de celle des ondes de densité spirales.

# 3 La structure spirale de la Voie Lactée

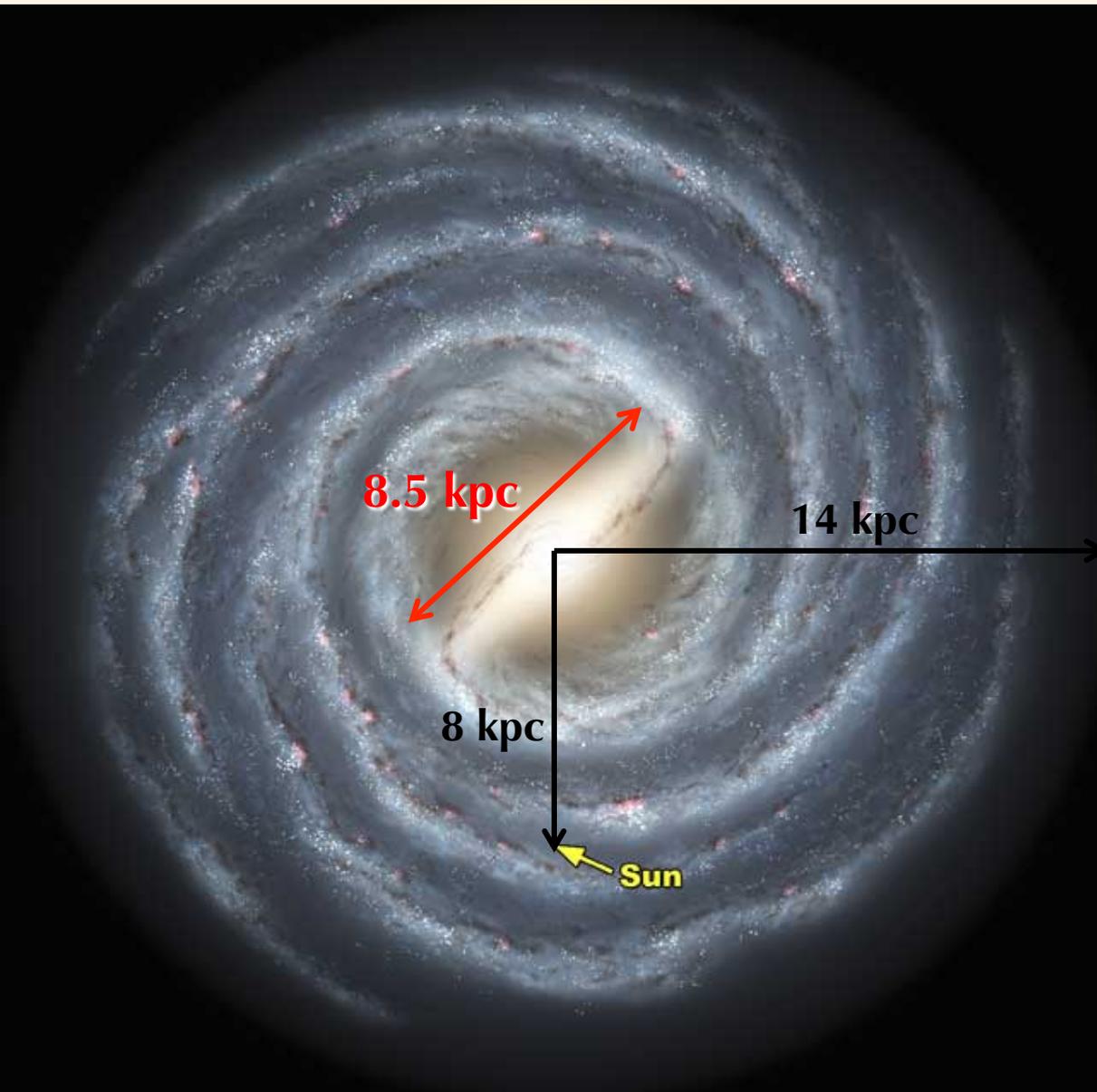
1. Galactic Core and Bar
2. 3kpc Arm
3. Norma Arm
4. Crux Arm
5. Carina Arm
6. Newly discovered extension of the Outer Arm
7. Outer Arm
8. Perseus Arm
9. Sagittarius Arm
10. Scutum Arm
11. Orion Arm
12. Location of our Sun



# 3 La structure spirale de la Voie Lactée



# La Voie Lactée: une galaxie de type SBbc



La Voie Lactée est une galaxie de type SBbc qui possède :

- **disque "fin":**  $M^* \sim 6 \times 10^{10} M_{\odot}$  d'étoiles jeunes (Population I), de gaz et de poussières (100 pc d'épaisseur)
- **disque "épais":**  $M^* \sim 10^9 M_{\odot}$  d'étoiles vieilles (population II), sans gaz ni poussières (1000 pc d'épaisseur)
- **bulbe central:**  $M^* \sim 1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$  d'étoiles vieilles + un peu d'étoiles jeunes, de gaz et poussières ( $R=1\text{kpc}$ )
- **barre centrale :** transporte du gaz dans une région de 1kpc où se produit de la formation d'étoiles.
- **halo:**  $M^* \sim 10^8 M_{\odot}$  d'étoiles vieilles

## 4 Théorème du viriel et masse de la Voie Lactée: Origine de l'aplatissement du disque de la V.L.

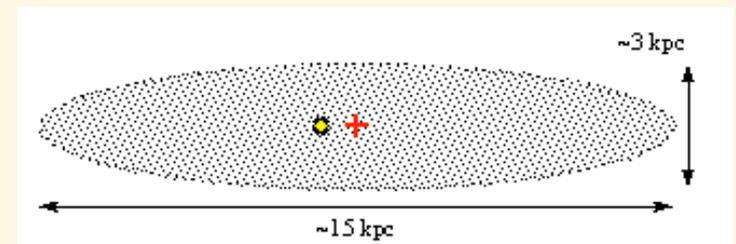
La Voie Lactée est composée au centre d'un bulbe qui possède des propriétés similaires à celles des galaxies elliptiques et un disque.

Bertil Lindblad (1927):

la vitesse radiale des amas globulaires de la Voie Lactée (V.L.) atteint  $250 \text{ km s}^{-1}$   
(déduite du décalage Doppler de leurs raies en absorption)

Ceci dépasse la vitesse de libération calculée par Kapteyn (1922) où la V.L. est un disque aplati de  $15 \text{ kpc} \times 3 \text{ kpc}$  avec le soleil décentré et une décroissance rapide de la densité d'étoiles

(90 % des étoiles de la V.L. dans  $R < 2800 \text{ pc}$ )



Les étoiles proches ont une vitesse négligeable par rapport au soleil

⇒ mouvements circulaires des étoiles bien ordonné autour du centre de la V.L.

⇒ ces mouvements sont responsables de l'aplatissement du disque de la V.L.

## 4 Théorème du Viriel et masse de la Voie Lactée

On considère les étoiles des amas globulaires, les galaxies et les amas de galaxies comme des systèmes en équilibre dynamique gravitationnel.

Cette hypothèse est confortée par la comparaison du "crossing time" (temps de traversée) d'un objet à l'intérieur du système avec son âge: si les étoiles ont eu le temps de traverser plusieurs fois une galaxie, la galaxie a atteint son état d'équilibre. Sinon, les étoiles auraient déjà quitté la galaxie.

Crossing time:  $t_c = R/\langle v \rangle$

où  $R$  = taille du système,  $\langle v \rangle$  = vitesse typique ou dispersion de vitesses

Au niveau du soleil (8.5 kpc du centre de la VL), la vitesse de rotation des étoiles:

$v_* \approx 220 \text{ km s}^{-1} \Rightarrow$  une rotation complète en:  $t = 2\pi R/v_* \approx 2.5 \times 10^8$  ans

La VL étant âgée de près de  $10^{10}$  ans (40 tours), elle est gravitationnellement liée.

Depuis sa naissance (-4.56 Gyr), le système solaire a effectué 18 tours, il est majeur !

## 4 Théorème du Viriel et masse de la Voie Lactée

Le théorème du viriel (introduit par Clausius en 1870 pour relier l'énergie thermique d'un gaz et son potentiel gravitationnel, son énergie magnétique,...) permet de relier le potentiel gravitationnel et l'énergie cinétique des systèmes en équilibre gravitationnel. Le viriel,  $\Sigma_i = -1/2 \langle r_i \cdot F_i \rangle$  ( $F_i$  = force agissant sur la particule en  $r_i$ ), représente l'énergie cinétique moyenne du système.

Théorème du Viriel:  $2T - |U| = 0$ , i.e. énergie cinétique = potentiel gravitationnel/2  
(cf démonstration Sect.3.4.1 "Galaxy Formation" M.Longair)

$$v_*^2 = GM_{VL}/R_\odot \Rightarrow M_{VL} = R_\odot v^2 / G \quad (G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1})$$

où:  $R_\odot = 8.5 \text{ kpc} = 8.5 \times 3.0856 \times 10^{19} \text{ m}$  ( $M_\odot$  = masse du soleil =  $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ )

$$v_\odot = 220 \text{ km.s}^{-1} \Rightarrow \mathbf{M(V.L.) \approx 10^{11} M_\odot}$$

=> assez bonne approximation de la masse stellaire de la V.L. (disque + bulbe  $\sim 8 \times 10^{10} M_\odot$ )

*N.B.: A la distance des nuages de gaz aux bords du disque ( $R_{gaz} = 16 \text{ kpc}$ ,  $v_{gaz} = 275 \text{ km.s}^{-1}$ ):*

$$\mathbf{M(V.L.) = 2.8 \times 10^{11} M_\odot \rightarrow \text{composante « noire »}$$

## 4 Théorème du Viriel pour les galaxies elliptiques

En pratique, on ne mesure que la vitesse radiale des étoiles dans les galaxies extérieures.

Cette technique est aussi adaptée à la mesure de la masse des galaxies elliptiques, centrosymétriques, où l'on peut supposer que les vitesses dans les directions perpendiculaires à la ligne de visée sont égales à  $v_{||}$ , alors:  $v_{\text{tot}}^2 = 3v_{||}^2$

*N.B.: le théorème du viriel ne requière aucune hypothèse sur la distribution des vitesses des étoiles. Celle-ci peut être aléatoire, comme dans le cas des amas globulaires ou des galaxies elliptiques, ou fortement ordonnée, comme dans celui des galaxies spirales. Dans tous les cas, le théorème du viriel reste valide si le système est en équilibre et celui-ci ne nous apprend rien sur la distribution des vitesses des étoiles dans le système.*

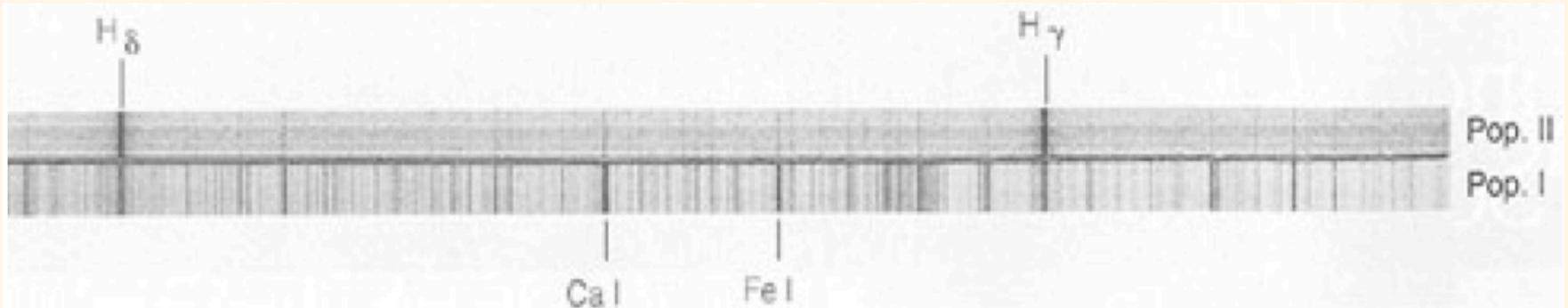
# 5 Populations stellaires

Les étoiles ont été classées selon leur composition chimique par Baade (1941):

**Population I** : les étoiles du voisinage solaire, des amas ouverts, et plus généralement du disque des galaxies spirales. Ce sont des *étoiles jeunes* de métallicité solaire (en masse): 70% H ( $X=0.7$ ), 28% He ( $Y$ ), ~2% métaux ( $Z$ )

**Population II** : ces *étoiles plus anciennes* se trouvent principalement dans le halo des galaxies spirales et en particulier dans les amas globulaires (qui ne constituent que 1 % des étoiles du halo).

**Métallicité 0.1-1% solaire: 75% H, 24.99% He, ~0.01% métaux**



# 5 Populations stellaires

Les étoiles ont été classées selon leur composition chimique par Baade (1941):

**Population I** : les étoiles du voisinage solaire, des amas ouverts, et plus généralement du disque des galaxies spirales. Ce sont des *étoiles jeunes* de Métallicité solaire (en masse): 70% H ( $X=0.7$ ), 28% He ( $Y$ ), ~2% métaux ( $Z$ )

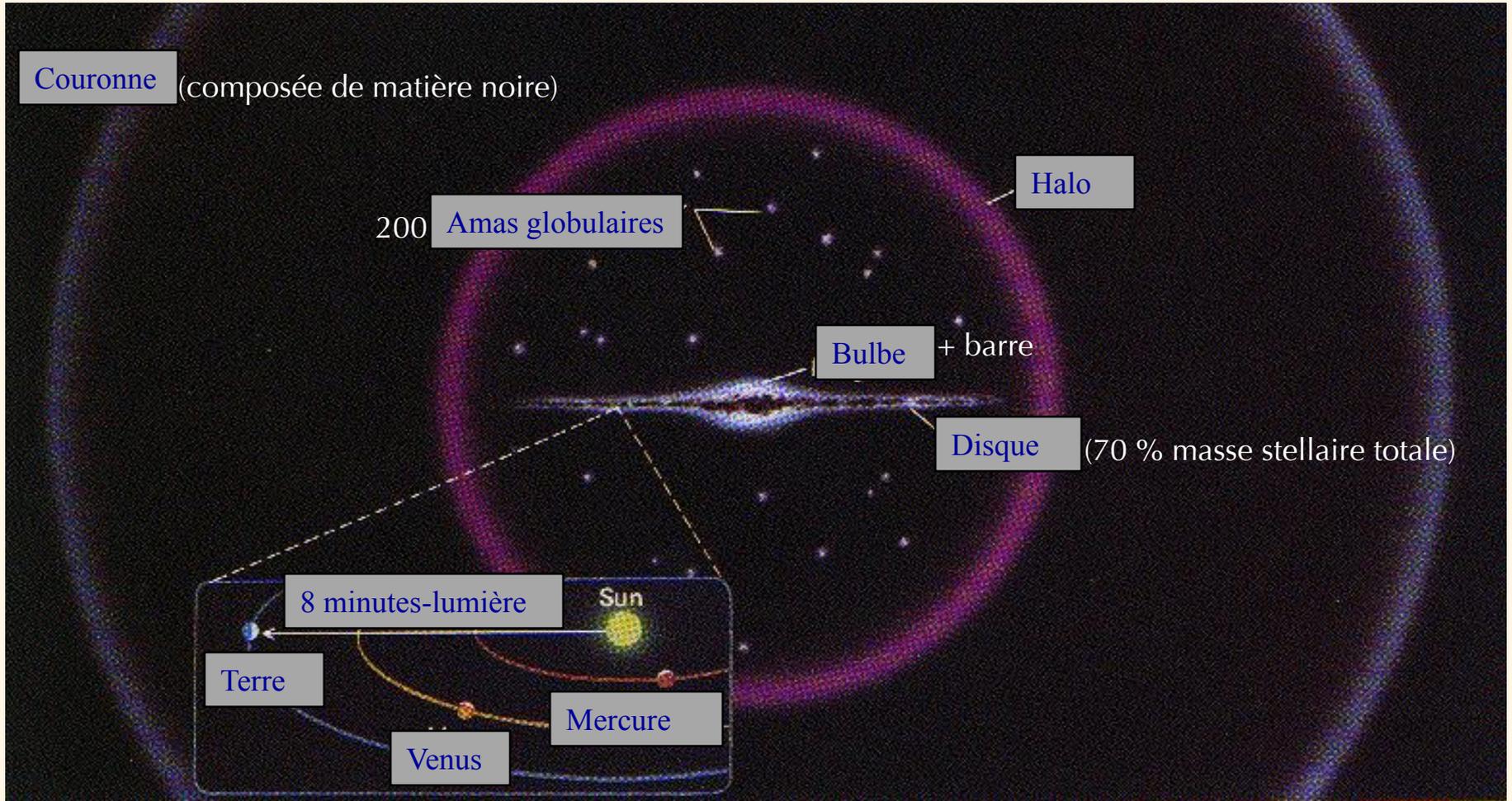
**Population II** : ces *étoiles plus anciennes* se trouvent principalement dans le halo des galaxies spirales et en particulier dans les amas globulaires (qui ne constituent que 1 % des étoiles du halo).

**Métallicité 0.1-1% solaire: 75% H, 24.99% He, ~0.01% métaux**

Aujourd'hui, on parle aussi de:

- *Population I extrême*: les étoiles les plus jeunes.
- **Population III**: les premières étoiles formées, à partir d'une gaz non enrichi en éléments lourds, puisqu'il n'y aurait eu aucune génération d'étoiles antérieures. On pense que les étoiles de population III étaient massives (plus de  $100 M_{\odot}$ ).
- Elles ont dû exploser très tôt et disperser autour d'elles les éléments qu'elles avaient synthétisées, affectant ainsi la composition chimique de leurs contemporaines.

# Les composantes de la Voie Lactée



| <u><i>amas stellaires</i></u>   | <u><i>amas ouverts</i></u>   |  | <u><i>amas globulaires</i></u>  |
|---|--|---|---|
| richesse  | <b>10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> étoiles</b>   | <b><u><i>amas ouvert (M7)</i></u></b>   | <b>10<sup>4</sup> à 10<sup>6</sup> étoiles</b>  |
| rayon de cœur, $r_c$<br>(où brillance=1/2 centrale)                         | <b>1 pc</b>  |   | <b>1.5 pc</b>   |
| rayon de 1/2 lumière, $r_h$<br>(half-light radius; où brillance= 1/2 total) | <b>2 pc</b>  |   | <b>10 pc</b>  |
| rayon limite ou de marée, $r_t$<br>(tidal, densité= 0)                      | <b>10 pc</b>   |   | <b>50 pc</b>  |
| Densité (0.05 $M_\odot \text{pc}^{-3}$<br>voisinage solaire !)              | <b>100 <math>M_\odot \text{pc}^{-3}</math></b>   |   | <b>10<sup>4</sup> <math>M_\odot \text{pc}^{-3}</math></b>   |
| Age   | <b>~2x10<sup>8</sup> ans</b>   |   | <b>10<sup>10</sup> ans</b>  |
| Masse   | <b>250 <math>M_\odot</math></b>  |   | <b>6x10<sup>5</sup> <math>M_\odot</math></b>  |
| Etoiles   | <b>Population I = étoiles de 2<sup>nd</sup>e génération nées récemment, à partir d'un milieu interstellaire déjà enrichi en métaux (donc étoiles riches en métaux).</b>  |   | <b>Population II. Ils ne contiennent ni gaz, ni poussière, ni étoiles jeunes.</b>                         |
| Formation   | <b>De nouveaux amas ouverts sont formés de manière continue. Les amas plus vieux ont probablement été disloqués par les perturbations gravitationnelles provoquées par le passage de nuages interstellaires.</b> |   | <b>Très vieux, ils datent de l'époque de la formation de la V.L. Sphériques et dynamiquement stables.</b> |
| Localisation  | <b>On trouve les amas ouverts dans le disque de la Voie Lactée. Ils sont près de 10<sup>5</sup>.</b>   |   | <b>Distribution sphérique, halo de la V.L., concentrée vers centre galactique. ~200 dans le halo.</b>     |

## 6 Détermination de la masse des composantes stellaires

(1) On mesure la luminosité de la galaxie dans un filtre: par exemple, dans le bleu (bande B à 4400 Å) ou l'infrarouge proche (bande K à 2.2 μm) : L(B) ou L(K)

(2) On étudie le spectre optique de la galaxie, ou de l'une de ses régions, pour déterminer sa population stellaire (âge, température moyenne, distribution en masses des étoiles): chaque étoile possède une masse et une luminosité et donc un « rapport masse sur luminosité, M/L »

=> une population d'étoiles possède un M/L intégré

Les modèles de synthèse de populations stellaires permettent de reproduire les distributions spectrales en énergie (SED) des galaxies avec une population synthétique et d'en déduire un rapport  $M_*/L(K)$  (il ne s'agit pas de la masse totale mais de la masse d'étoiles). On déduit ensuite  $M_*$  de  $L(K) \times M_*/L(K)$

## 6 Détermination de la masse des composantes stellaires

### *Calcul de la masse stellaire du bulbe:*

A l'aide d'un modèle de synthèse de population (compilation de Charlot et al. 1996) et pour un sphéroïde (étoiles de pop° II), Fukugita, Hogan & Peebles (1998) trouvent:

$$(M_*/L_V)_{\text{GBF}} = (4.0 \pm 0.3) + 0.38(t_G - 10 \text{ Gyr}) M_{\odot}/L_{V,\odot}$$

où  $t_G$  est l'âge du sphéroïde et GBF indique la fonction de masse initiale (IMF), i.e. la proportion des étoiles en fonction de leur masse au moment de leur naissance (celle de Gould, Bahcall & Flynn 1996, ApJ 465, 759). Ce qui donne:

$$(M_*/L_V)_{\text{GBF}} = (4.8 \pm 1.1) M_{\odot}/L_{V,\odot} \text{ pour } t_G = 12 \pm 2 \text{ Gyr}$$

Une valeur proche de celle de **Binney & Tremaine pour le bulbe de la V.L. ( $M/L_V=5$ )**

A l'aide de la couleur, B-V, on en déduit M/L en bande B:

$$(M_*/L_B)_{\text{GBF}}^{\text{bulbe}} = (5.4 \pm 0.3) + 0.7(t_G - 10 \text{ Gyr}) M_{\odot}/L_{B,\odot}$$

$$\Rightarrow (M_*/L_B)_{\text{GBF}}^{\text{bulbe}} = (6.8 \pm 1.7) M_{\odot}/L_{B,\odot} \text{ pour } t_G = 12 \pm 2 \text{ Gyr (halo/bulbe)}$$

### **Masse de la Voie Lactée:**

$$L_V(\text{disque}) = 1.2 \times 10^{10} L_{\odot} [x 5 = (M/L_V)] \quad \Rightarrow M_*(\text{disque}) = 6.0 \times 10^{10} M_{\odot}$$

$$L_B(\text{bulbe}) = 0.25 \times 10^{10} L_{\odot} [x 6.8 = (M/L_B)_{\text{GBF}}] \quad \Rightarrow M_*(\text{bulbe}) = 1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$$

## Matière noire versus masse stellaire

Notez bien que pour une galaxie spirale:

$$M_*(\text{étoiles})/L_B \approx 5 M_{\odot}/L_{B,\odot}$$

$$M(\text{dynamique})/L_B \geq 30 M_{\odot}/L_{B,\odot}$$

La masse totale de la Voie Lactée calculée par Lynden-Bell et al. (1983) en utilisant les amas globulaires à la périphérie de la Voie Lactée ou encore les galaxies satellites qui gravitent autour est de:

$$M_{\text{tot}}(\text{Voie Lactée}) \approx 0.2\text{-}2 \times 10^{12} M_{\odot}$$

à comparer à :  $M_*(\text{Voie Lactée}) \approx 7.8 \times 10^{10} M_{\odot}$

Ce qui donne :  $M_{\text{tot}}/M_*(\text{Voie Lactée}) \approx 10$

# 7 Les composantes de la Voie Lactée

|   | <b>Métallicité</b>           | <b>Age *</b>     | <b>M*</b>                                 |
|---|------------------------------|------------------|---|
| <b>Bulbe</b>  | <b>Z~0.4Z<sub>⊙</sub></b>    | <b>12-15 Gyr</b> | <b>1.7x10<sup>10</sup> M<sub>⊙</sub></b>  |
| Pop° II intermédiaire [Minniti 1995, Barbuy et al. 1999] [Ortolani et al. 1995] |                              |                  |   |
| Pop° II extrême au centre   | Z<0.4Z <sub>⊙</sub>          | 10-14 Gyr        |   |
| <b>Halo Pop° II extrême</b>   | <b>Z&lt;0.4Z<sub>⊙</sub></b> | <b>10-14 Gyr</b> | <b>0.01x10<sup>10</sup> M<sub>⊙</sub></b> |
| <b>Disque épais</b>   | <b>Z=0.25xZ<sub>⊙</sub></b>  | <b>10 Gyr</b>    | <b>0.1x10<sup>10</sup> M<sub>⊙</sub></b>  |
| <b>Disque fin</b>   |                              |                  | <b>6x10<sup>10</sup> M<sub>⊙</sub></b>    |
| Pop° I extrême (bras spiraux)   | Z~1.5xZ <sub>⊙</sub>         | 0.02-0.05 Gyr    |   |
| Pop° I intermédiaire (ailleurs)   | Z=0.5-1xZ <sub>⊙</sub>       | 1-10 Gyr         |   |

Gyr= giga-year= 10<sup>9</sup> ans

**Abondance en nombre:** [Fe/H]=0 ⇒ métallicité solaire

**Abondance en masse:**

Z=(masse en éléments autres que H et He)/(masse totale) = 0.02 ⇒ métallicité solaire

[α/Fe]= éléments α produits lors de la nucléosynthèse explosive des Supernovae de type II (étoiles plus massives que 8 M<sub>⊙</sub>) par capture de noyaux d'Hélium, dits noyaux α.

Ces éléments sont : C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti

$$[Fe / H] = \log_{10} \left( \frac{n(Fe)}{n(H)} \right)_* - \log_{10} \left( \frac{n(Fe)}{n(H)} \right)_e$$

$$[O / Fe] = \log_{10} \left( \frac{n(O)}{n(Fe)} \right)_* - \log_{10} \left( \frac{n(O)}{n(H)} \right)_e$$

# Définition de la métallicité/abondance

## **Abondance en masse:**

$$X = (\text{masse d'H}) / (\text{masse totale})$$

$$X_{\odot} = 0.715 \Rightarrow \text{métallicité}$$

$$Y = (\text{masse d'He}) / (\text{masse totale})$$

$$Y_{\odot} = 0.27$$

La valeur primordiale :  $Y_p = M_{\text{He}} / M_{\text{totale}} = 0.24$ , donc **DY=0.03** générés par les étoiles.

$$Z = (\text{masse } > \text{H, He}) / (\text{masse totale})$$

$$Z_{\odot} = 0.0142 \text{ (Asplund +2009, ARAA)}$$

(anciennement  $Z_{\odot} = 0.02$ )

$[\alpha/\text{Fe}]$  = éléments  $\alpha$  produits lors de la nucléosynthèse explosive des Supernovae de type II (étoiles plus massives que  $8 M_{\odot}$ ) par capture de noyaux d'Hélium, dits noyaux  $\alpha$ . Ces éléments sont : C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti

## **Métallicité en nombre:**

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 0 \Rightarrow \text{métallicité solaire}$$

$$[\text{Fe} / \text{H}] = \log_{10} \left( \frac{n(\text{Fe})}{n(\text{H})} \right)_* - \log_{10} \left( \frac{n(\text{Fe})}{n(\text{H})} \right)_e$$

$$[\text{O} / \text{Fe}] = \log_{10} \left( \frac{n(\text{O})}{n(\text{Fe})} \right)_* - \log_{10} \left( \frac{n(\text{O})}{n(\text{Fe})} \right)_e$$

## **Métallicité:**

$12 + \log_{10}(\text{O}/\text{H})$  qui vaut 8.69 pour le voisinage solaire

## Abondance en masse:

$X = (\text{masse d'H}) / (\text{masse totale})$

$X_{\odot} = 0.715 \Rightarrow$  métallicité

$Y = (\text{masse d'He}) / (\text{masse totale})$

$Y_{\odot} = 0.27$

La valeur primordiale :  $Y_p = M_{\text{He}} / M_{\text{totale}} = 0.24$ , donc **DY=0.04** générés par les étoiles.

$Z = (\text{masse } > \text{H, He}) / (\text{masse totale})$

$Z_{\odot} = 0.02 \Rightarrow 0.0142$  métallicité solaire

(Asplund +2009, ARAA)

| Source                                | X      | Y      | Z      | Z/X    |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Present-day photosphere:</b>       |        |        |        |        |
| Anders & Grevesse (1989) <sup>a</sup> | 0.7314 | 0.2485 | 0.0201 | 0.0274 |
| Grevesse & Noels (1993) <sup>a</sup>  | 0.7336 | 0.2485 | 0.0179 | 0.0244 |
| Grevesse & Sauval (1998)              | 0.7345 | 0.2485 | 0.0169 | 0.0231 |
| Lodders (2003)                        | 0.7491 | 0.2377 | 0.0133 | 0.0177 |
| Asplund, Grevesse & Sauval (2005)     | 0.7392 | 0.2485 | 0.0122 | 0.0165 |
| Lodders, Palme & Gail (2009)          | 0.7390 | 0.2469 | 0.0141 | 0.0191 |
| Present work                          | 0.7381 | 0.2485 | 0.0134 | 0.0181 |
| <b>Protosolar:</b>                    |        |        |        |        |
| Anders & Grevesse (1989)              | 0.7096 | 0.2691 | 0.0213 | 0.0301 |
| Grevesse & Noels (1993)               | 0.7112 | 0.2697 | 0.0190 | 0.0268 |
| Grevesse & Sauval (1998)              | 0.7120 | 0.2701 | 0.0180 | 0.0253 |
| Lodders (2003)                        | 0.7111 | 0.2741 | 0.0149 | 0.0210 |
| Asplund, Grevesse & Sauval (2005)     | 0.7166 | 0.2704 | 0.0130 | 0.0181 |
| Lodders, Palme & Gail (2009)          | 0.7112 | 0.2735 | 0.0153 | 0.0215 |
| Present work                          | 0.7154 | 0.2703 | 0.0142 | 0.0199 |

**Métallicité:  $12 + \log_{10}(X/H)$**

| Z  | Element | Photosphere          | Meteorites      | Z  | Element | Photosphere         | Meteorites      |
|----|---------|----------------------|-----------------|----|---------|---------------------|-----------------|
| 1  | H       | 12.00                | $8.22 \pm 0.04$ | 44 | Ru      | $1.75 \pm 0.08$     | $1.76 \pm 0.03$ |
| 2  | He      | [ $10.93 \pm 0.01$ ] | 1.29            | 45 | Rh      | $0.91 \pm 0.10$     | $1.06 \pm 0.04$ |
| 3  | Li      | $1.05 \pm 0.10$      | $3.26 \pm 0.05$ | 46 | Pd      | $1.57 \pm 0.10$     | $1.65 \pm 0.02$ |
| 4  | Be      | $1.38 \pm 0.09$      | $1.30 \pm 0.03$ | 47 | Ag      | $0.94 \pm 0.10$     | $1.20 \pm 0.02$ |
| 5  | B       | $2.70 \pm 0.20$      | $2.79 \pm 0.04$ | 48 | Cd      |                     | $1.71 \pm 0.03$ |
| 6  | C       | $8.43 \pm 0.05$      | $7.39 \pm 0.04$ | 49 | In      | $0.80 \pm 0.20$     | $0.76 \pm 0.03$ |
| 7  | N       | $7.83 \pm 0.05$      | $6.26 \pm 0.06$ | 50 | Sn      | $2.04 \pm 0.10$     | $2.07 \pm 0.06$ |
| 8  | O       | $8.69 \pm 0.05$      | $8.40 \pm 0.04$ | 51 | Sb      |                     | $1.01 \pm 0.06$ |
| 9  | F       | $4.56 \pm 0.30$      | $4.42 \pm 0.06$ | 52 | Te      |                     | $2.18 \pm 0.03$ |
| 10 | Ne      | [ $7.93 \pm 0.10$ ]  | -1.12           | 53 | I       |                     | $1.55 \pm 0.08$ |
| 11 | Na      | $6.24 \pm 0.04$      | $6.27 \pm 0.02$ | 54 | Xe      | [ $2.24 \pm 0.06$ ] | -1.95           |
| 12 | Mg      | $7.60 \pm 0.04$      | $7.53 \pm 0.01$ | 55 | Cs      |                     | $1.08 \pm 0.02$ |
| 13 | Al      | $6.45 \pm 0.03$      | $6.43 \pm 0.01$ | 56 | Ba      | $2.18 \pm 0.09$     | $2.18 \pm 0.03$ |
| 14 | Si      | $7.51 \pm 0.03$      | $7.51 \pm 0.01$ | 57 | La      | $1.10 \pm 0.04$     | $1.17 \pm 0.02$ |
| 15 | P       | $5.41 \pm 0.03$      | $5.43 \pm 0.04$ | 58 | Ce      | $1.58 \pm 0.04$     | $1.58 \pm 0.02$ |
| 16 | S       | $7.12 \pm 0.03$      | $7.15 \pm 0.02$ | 59 | Pr      | $0.72 \pm 0.04$     | $0.76 \pm 0.03$ |
| 17 | Cl      | $5.50 \pm 0.30$      | $5.23 \pm 0.06$ | 60 | Nd      | $1.42 \pm 0.04$     | $1.45 \pm 0.02$ |
| 18 | Ar      | [ $6.40 \pm 0.13$ ]  | -0.50           | 62 | Sm      | $0.96 \pm 0.04$     | $0.94 \pm 0.02$ |
| 19 | K       | $5.03 \pm 0.09$      | $5.08 \pm 0.02$ | 63 | Eu      | $0.52 \pm 0.04$     | $0.51 \pm 0.02$ |
| 20 | Ca      | $6.34 \pm 0.04$      | $6.29 \pm 0.02$ | 64 | Gd      | $1.07 \pm 0.04$     | $1.05 \pm 0.02$ |
| 21 | Sc      | $3.15 \pm 0.04$      | $3.05 \pm 0.02$ | 65 | Tb      | $0.30 \pm 0.10$     | $0.32 \pm 0.03$ |
| 22 | Ti      | $4.95 \pm 0.05$      | $4.91 \pm 0.03$ | 66 | Dy      | $1.10 \pm 0.04$     | $1.13 \pm 0.02$ |
| 23 | V       | $3.93 \pm 0.08$      | $3.96 \pm 0.02$ | 67 | Ho      | $0.48 \pm 0.11$     | $0.47 \pm 0.03$ |
| 24 | Cr      | $5.64 \pm 0.04$      | $5.64 \pm 0.01$ | 68 | Er      | $0.92 \pm 0.05$     | $0.92 \pm 0.02$ |
| 25 | Mn      | $5.43 \pm 0.04$      | $5.48 \pm 0.01$ | 69 | Tm      | $0.10 \pm 0.04$     | $0.12 \pm 0.03$ |
| 26 | Fe      | $7.50 \pm 0.04$      | $7.45 \pm 0.01$ | 70 | Yb      | $0.84 \pm 0.11$     | $0.92 \pm 0.02$ |

# Caractéristiques de la Voie Lactée

## Classification de la Galaxie

SBbc

Diamètre & masse du disque fin

28 kpc,  $6 \times 10^{10} M_{\odot}$  ( $v_{\text{rot}} \sim 250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Autres composantes

disque épais:  $10^9 M_{\odot}$ , halo:  $10^8 M_{\odot}$

Diamètre & masse du bulbe

4.6 kpc,  $1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$  ( $v_{\text{rot}} \sim 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

## Masse totale d'étoiles

**$7.8 \times 10^{10} M_{\odot}$**  (disque  $\approx 78\%$ , bulbe  $\approx 22\%$ )

Diamètre de la couronne

110 kpc (extension matière noire)

## Masse totale de la Galaxie

**$\approx 10^{12} M_{\odot}$  (matière noire incluse)**

Longueur de la barre centrale

8 kpc

Distance du Soleil au centre

8.5 +/- 0.5 kpc

Épaisseur Galaxie au niveau Soleil

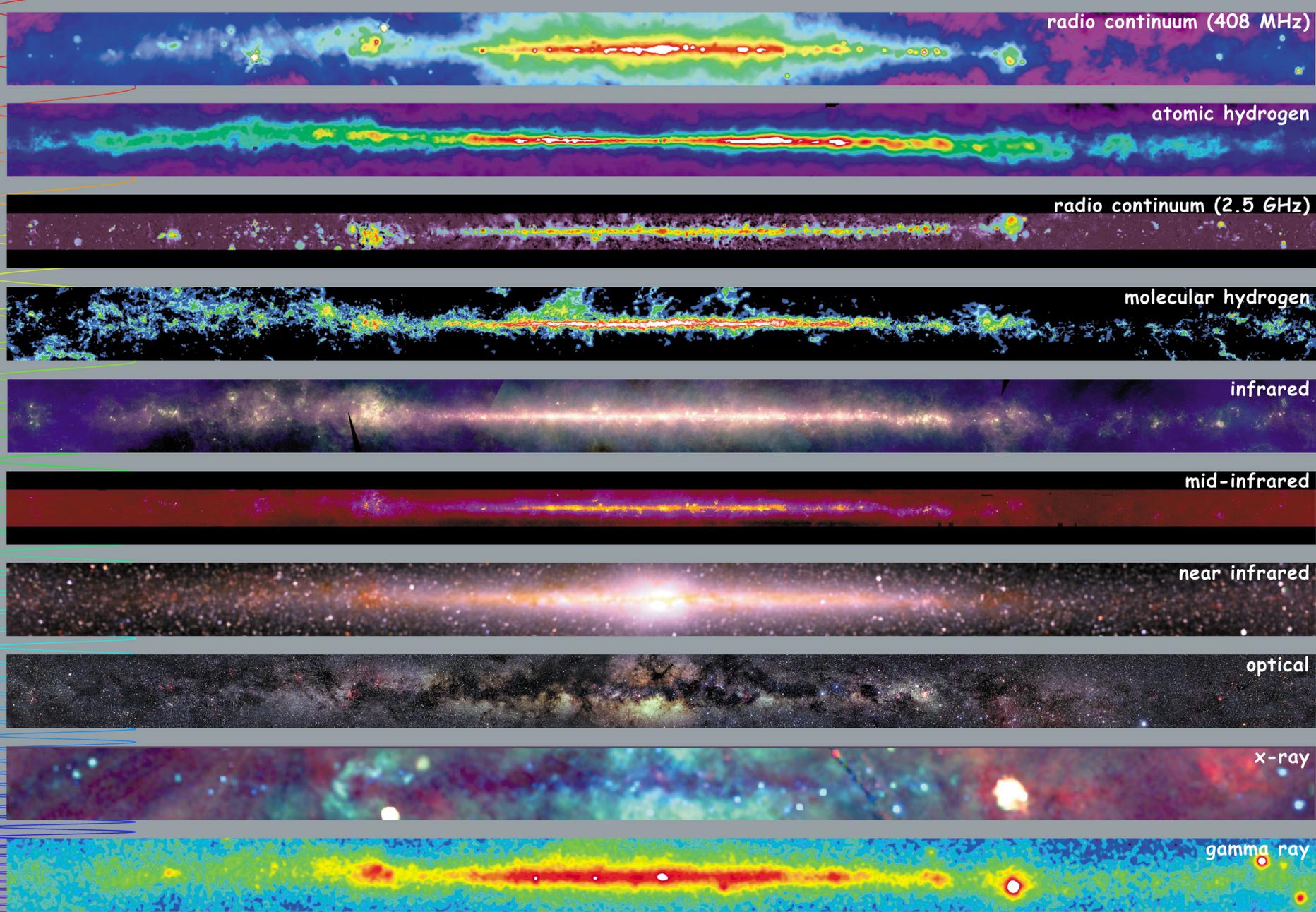
615 pc

Vitesse du Soleil dans la Galaxie

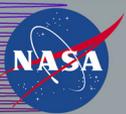
220 km/sec

Période de révolution du Soleil

225 millions années



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



# Multiwavelength Milky Way